

令和元年6月17日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02641

研究課題名（和文）次世代PETコンセプト「Whole Gamma Imaging」の実証

研究課題名（英文）Proof of the next generation PET concept "Whole Gamma Imaging"

研究代表者

山谷 泰賀（Yamaya, Taiga）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所 計測・線量評価部・チームリーダー（定常）

研究者番号：40392245

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、PETとコンプトンカメラを融合したwhole gamma imaging (WGI)を提案した。通常のPET検出器リングの内側に散乱検出器専用の検出器リングを追加する独自アイデアである。そして、PET検出器リング（内径66cm、体軸長22cm、 $2.9 \times 2.9 \times 7.5$ mm<sup>3</sup> GSOZ結晶の16x16x4層配置のDOI検出器）に散乱検出器リング（内径20cm、体軸長5cm、 $1.0 \times 1.0 \times 6.0$ mm<sup>3</sup> GAGG結晶の24x24アレイ）を組み込んだ試作機を開発し、世界初となるWGIのコンセプト実証に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

WGIの基本的な考え方は、検出可能なすべてのガンマ線を画像化に利用することである。PET検出器を吸収検出器として利用するコンプトンイメージングにより、単一のガンマ線でも検出できるようになる。さらに、陽電子放出と同時にガンマ線も放出する核種に対しては、PETによる同時計数線とコンプトンコーン（円錐表面）の交点として核種位置を特定できることから、ごくわずかな放射能でも体内位置を推定できるようになる可能性がある。このように、本研究成果は、従来のPETの原理自体を打ち破るものであり、より微量でより多様な診断薬の生体内画像化を可能にするものである。

研究成果の概要（英文）：In this work, we proposed a new concept of whole gamma imaging (WGI), which is a novel combination of PET and Compton imaging. An additional detector ring, which was used as the scatterer, was inserted in the field-of-view of a conventional PET ring so that single gamma rays can be detected by the Compton imaging method. We prototyped the insert geometry whereby a scatter ring (24 x 24 array of 1 x 1 x 6 mm<sup>3</sup> GAGG crystals, 20 cm in diameter and 5 cm long) was inserted into a PET ring (16 x 16 x 4-DOI array of 2.9 x 2.9 x 7.5 mm<sup>3</sup> GSOZ crystals, 66 cm in diameter and 22 cm long). Experimental results showed the initial feasibility of the WGI concept.

研究分野：核医学物理

キーワード：核医学 PET コンプトン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

PET はがん診断や分子イメージングにおいて不可欠な手法であるが、より微量でより多様な核種の画像化など新たなニーズに応えるためには、PET の原理自体を打ち破る必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、PET とコンプトンカメラを融合した whole gamma imaging (WGI)を提案し、その原理実証を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

WGI の基本的な考え方は、検出可能なすべてのガンマ線を画像化に利用することである(図1)。ポイントは、通常の PET 検出器リングの内側に散乱検出器専用の検出器リングを追加することである。PET 検出器を吸収検出器として利用するコンプトンイメージングにより、単一のガンマ線でも検出できるようになる。さらに、陽電子放出と同時にガンマ線も放出する核種(ここではトリプルガンマ核種と呼ぶ)に対しては、PET による同時計数線とコンプトンコーン(円錐表面)の交点として核種位置を特定できることから、ごくわずかな放射能でも体内位置を推定できるようになる可能性がある。トリプルガンマ核種としては、1157keV のガンマ線をほぼ同時に放出する陽電子放出核種である  $^{44}\text{Sc}$  などがある。

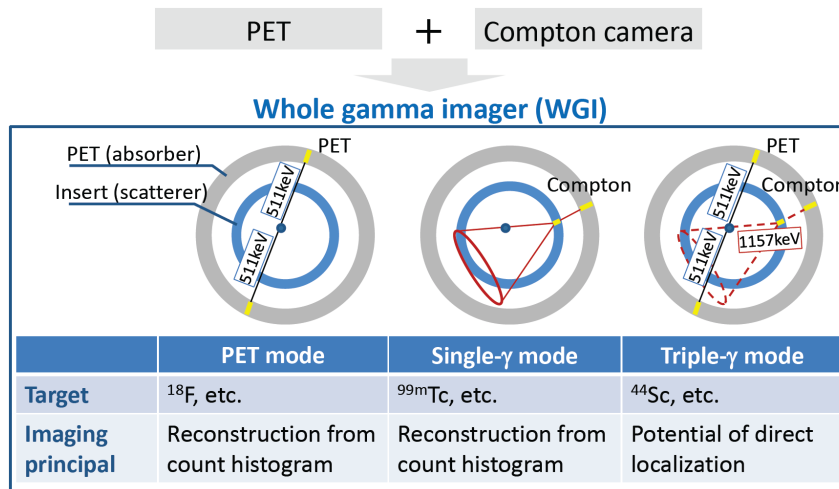


図1 WGI のコンセプト

4. 研究成果

(1) 計算機シミュレーション

GEANT4 により、PET 検出器リング(内径 66cm、体軸長 22cm、 $2.9 \times 2.9 \times 7.5\text{mm}^3$  GSOZ 結晶の  $16 \times 16 \times 4$  層配置の DOI 検出器)に散乱検出器リング(内径 20cm、体軸長 5cm、 $1.0 \times 1.0 \times 6.0\text{mm}^3$  GAGG 結晶の  $24 \times 24$  アレイ)を組み込んだ装置をモデル化した(図 2 (a))。線源としては、1274keV ガンマ線を放出するトリプルガンマ核種である  $^{22}\text{Na}$  をシミュレートした。

トリプルガンマモードとして、コンプトンコーンにより特定される同時計数線上の位置を単純にプロットしていったところ、視野中心から 5cm 離れた線源位置において、半値幅で 7.3mm の位置特定性能が得られた(図 2 (b))。位置特定の効果は time-of-flight (TOF)方式とも類似するが、現状の TOF 位置特定性能(6cm から 7.5cm 程度)よりもはるかに優れた位置特性性能が期待される。

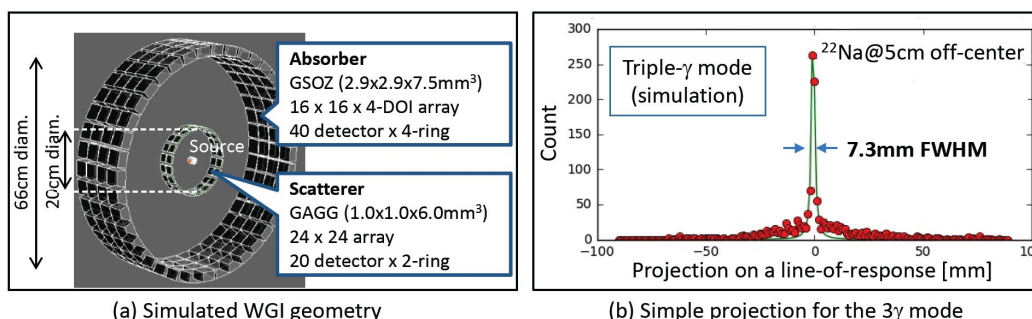
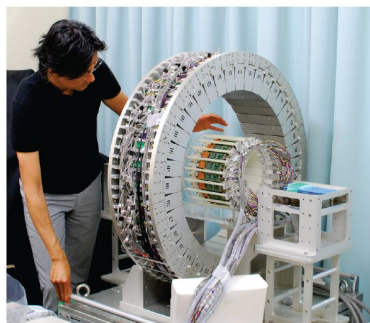


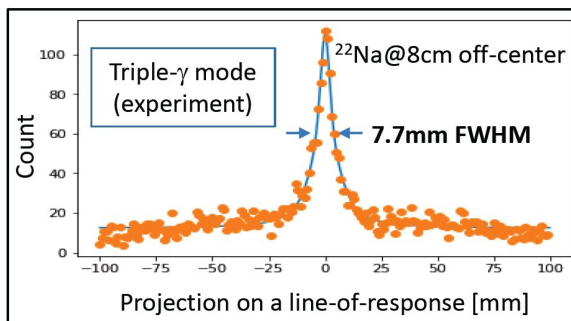
図2 設計した WGI システム(a)とトリプルガンマモードのシミュレーション結果(b)

## (2) 装置試作と実証実験

シミュレーション結果を受けて、WGI の第一号試作機を開発した(図 3)。主要パラメータはシミュレーションと同じである。検出器における放射線の相互作用のすべてはリストモードデータとして記録され、同じ事象かどうかの判定はソフトウェアで事後に行うようにした。そして、中心から 8cm 離れた位置において  $^{22}\text{Na}$  校正用線源を計測し、トリプルガンマモードで同時計数線上にプロットしたところ、半値幅で 7.7mm の位置特定性能が得られた(図 3(b))。これは単純逆投影による結果であり、画像再構成手法は適用していない。シミュレーション結果と比較して、やや強いバイアス成分が見られたが、ほぼ同程度の半値幅が得られた。



(a) Developed WGI system



(b) Simple projection for the 3 $\gamma$  mode

図 3 開発した WGI 試作機(a)とトリプルガンマモードの実験結果(b)

## (3) 結果のまとめ

シミュレーションおよび実機開発により、WGI の最初のコンセプト実証に成功した。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 2 件)

- [1] T. Hofmann, M. Pinto, A. Mohammadi, M. Nitta, F. Nishikido, Y. Iwao, H. Tashima, E. Yoshida, A. Chacon, M. Safavi-Naeini, A. Rosenfeld, T. Yamaya, K. Parodi, "Dose reconstruction from PET images in carbon ion therapy: a deconvolution approach," *Phys. Med. Biol.*, vol. 64, 025011, 2019.
- [2] R. S. Augusto, A. Mohammadi, H. Tashima, E. Yoshida, T. Yamaya, A. Ferrari, K. Parodi, "Experimental validation of the FLUKA Monte Carlo code for dose and  $\beta^+$ -emitter predictions of radioactive ion beams," *Phys. Med. Biol.*, vol. 63, 215014, 2018.

### 〔学会発表〕(計 28 件)

- [1] 山谷泰賀, "次世代 PET 装置開発研究～部位別からリアルタイムへ～," 第 28 回日本心臓核医学会総会・学術大会 特別講演, 2018. (伊藤国際学術研究センター) (招待講演)
- [2] 山谷泰賀, "Next-Generation Application-Dedicated PET Systems," 第 1 回量子線イメージング研究会, 2018. (京都大学) (招待講演)
- [3] 山谷泰賀, "未来 PET プロジェクト-OpenPET, 頭部専用 PET, そして WGI-," JSRT 2018 年度 近畿支部 秋季勉強会 未来へ繋がる医療技術～今を駆ける最新医療機器～, 2018. (住友病院) (招待講演)
- [4] Taiga Yamaya, "Current Status of NIRS Imaging Physics Research," Workshop on Multiple Photon Coincidence Imaging, 2018. (Narita Campus, International University of Health and Welfare) (招待講演)
- [5] S. Liprandi, S. Takyu, T. Binder, G. Dedes, K. Kamada, M. Kawula, R. Lutter, F. Nishikido, I. I. Valencia, R. Viegas, T. Yamaya, K. Parodi, P. G. Thirolf, "Monolithic LaBr<sub>3</sub>(Ce) absorber and segmented GAGG scatter detectors in a Compton camera arrangement for medical imaging," 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, M-20-03. (2018, oral; Sydney)
- [6] H. J. Rutherford, A. Chacon, S. Guatelli, Y. Iwao, H. Tashima, E. Yoshida, F. Nishikido, A. Kitagawa, M. Nitta, S. Takyu, G. Akamatsu, T. Hofmann, A. Mohammadi, K. Parodi, T. Yamaya, M. - C. Gregoire, A. B. Rozenfeld, M. Safavi-Naeini, "Dose Quantification in Carbon Therapy using In-Beam Positron Emission Tomography," 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, M-20-04. (2018, oral; Sydney)
- [7] F. Nishikido, M. Uenomachi, Z. Zhihong, K. Shimazoe, Y. Okumura, E. Yoshida, H. Tashima, K. Parodi, H. Takahashi, T. Yamaya, "Development of silicon detectors of whole gamma imager for low energy gamma ray measurement," 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, M-22-03. (2018, oral; Sydney)

- [8] S. Takyu, E. Yoshida, N. Inadama, F. Nishikido, M. Nitta, K. Kamada, K. Parodi, T. Yamaya, "Development of the 4-Layer GAGG DOI Detector for a Scatterer of Compton Camera," 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, M-03-034. (2018, poster; Sydney)
- [9] A. Chacon, H. J. Rutherford, A. Mohammadi, T. Yamaya, G. Akamatsu, Y. Iwao, H. Tashima, M. Nitta, S. Takyu, F. Nishikido, A. Kitagawa, T. Hofmann, M. Pinto, K. Parodi, M. - C. Gregoire, A. B. Rozenfeld, S. Guatelli, M. Safavi-Naeini, "Validation of Geant4 Monte Carlo Toolkit Physics Models for Use in Heavy Ion Therapy," 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, M-03-394. (2018, poster; Sydney)
- [10] Y. Okumura, E. Yoshida, H. Tashima, M. Suga, N. Kawachi, K. Parodi, T. Yamaya, "Sensitivity improvement in 44Sc whole gamma imaging: simulation study," 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, M-07-077. (2018, poster; Sydney)
- [11] A. Mohammadi, E. Yoshida, Y. Okumura, M. Nitta, F. Nishikido, A. Kitagawa, K. Kamada, K. Parodi, T. Yamaya, "Compton-PET imaging of 10C for Range Verification of Carbon Ion Therapy," 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, M-14-420. (2018, poster; Sydney)
- [12] 田島英朗, 吉田英治, 奥村勇介, 菅幹生, 河地有木, 鎌田圭, Katia Parodi, 山谷泰賀, "新しいコンセプトの装置「Whole Gamma Imaging」における陽電子・ガンマ線同時放出核種イメージングのための検出器応答関数の提案," 第37回日本医用画像工学会大会 講演予稿集, pp. 102-105, 2018. (筑波大学, OP2-1)
- [13] 田久創大, 吉田英治, 錦戸文彦, 新田宗孝, 鎌田圭, 山谷泰賀, "コンプトンカメラ・PET装置の散乱検出器の試作," 第65回応用物理学学会春季学術講演会 講演予稿集, 02-036, 2018 (19a-A304-11, 早稲田大学・西早稲田キャンパス).
- [14] Taiga Yamaya, Eiji Yoshida, Hideaki Tashima, Atsushi Tsuji, Kotaro Nagatsu, Mitsutaka Yamaguchi, Naoki Kawachi, Yusuke Okumura, Mikio Suga, Katia Parodi, "Whole gamma imaging (WGI) concept: simulation study of triple-gamma imaging," J. Nucl. Med., vol. 58, no. supplement 1, 152, 2017 (SNMMI 2017 Annual Meeting, oral, No. 152, デンバー (米国), Highlighted)
- [15] Taiga Yamaya, Eiji Yoshida, Kotaro Nagatsu, Hideaki Tashima, Yusuke Okumura, Mikio Suga, Naoki Kawachi, Kei Kamada, Peter G. Thirolf, Katia Parodi, "Whole gamma imaging (WGI) concept: demonstration of 44Sc triple gamma imaging," 2017 World Molecular Imaging Congress Program Schedule and Abstract Book, LBA 24, 2017. (oral, ペンシルバニア (米国))
- [16] Taiga Yamaya, Eiji Yoshida, Hideaki Tashima, Yusuke Okumura, Mikio Suga, Naoki Kawachi, Katia Parodi, "Whole gamma imaging: a simulation study of a novel combination of PET and Compton imaging," The 12th Asia Oceania Congress of Nuclear Medicine and Biology (AOCNMB 2017), BM1VIID-02, 2017. (oral, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市))
- [17] S. Takyu, S. Liprandi, F. Nishikido, A. Mohammadi, E. Yoshida, S. Aldawood, T. Binder, M. Mayerhofer, R. Lutter, I. I. Valencia Lozano, G. Dedes, K. Kamada, K. Parodi, P. G. Thirolf, T. Yamaya, "Development of a DOI-based Compton camera for nuclear medicine application," 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, M-08-003. (アトランタ (米国))
- [18] S. Liprandi, S. Takyu, S. Aldawood, T. Binder, G. Dedes, K. Kamada, R. Lutter, M. Mayerhofer, A. Miani, A. Mohammadi, F. Nishikido, D. R. Schaart, I. I. Valencia Lozano, E. Yoshida, T. Yamaya, K. Parodi, P. G. Thirolf, "Characterization of a Compton camera setup with monolithic LaBr3(Ce) absorber and segmented GAGG scatter detectors," 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, M-08-110. (poster, アトランタ (米国))
- [19] Eiji Yoshida, Hideaki Tashima, Yusuke Okumura, Mikio Suga, Naoki Kawachi, Kei Kamada, Katia Parodi, Taiga Yamaya, "Concrete realization of the whole gamma imaging concept," 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, M-21-2, 2017. (oral, アトランタ (米国))
- [20] Taiga Yamaya, Eiji Yoshida, Hideaki Tashima, Yuto Nagao, Mitsutaka Yamaguchi, Naoki Kawachi, Makoto Sakai, Yusuke Okumura, Mikio Suga, Katia Parodi, "Whole gamma imaging concept: feasibility study of triple-gamma imaging," 医学物理, Vol. 37, Sup. 1, p. 55, 2017. (第113回日本医学物理学学会学術大会, O-038, English oral, パシフィコ横浜) 英語プレゼンテーション賞受賞
- [21] Yusuke Okumura, Mikio Suga, Hideaki Tashima, Makoto Sakai, Mitsutaka Yamaguchi, Yuto Nagao, Naoki Kawachi, Taiga Yamaya, Eiji Yoshida, "Whole gamma imaging concept: Compton-PET imaging simulation for positron emitters," 医学物理,

- Vol. 37, Sup. 1, p. 56, 2017. (第 113 回日本医学物理学学会学術大会, O-039, oral, パシフィコ横浜)
- [22] 奥村勇介, 吉田英治, 田島英朗, 菅幹生, 河地有木, Katia Parodi, 山谷 泰賀, "新しいコンプトンPET装置の3ガンマイメージングシミュレーション," 第78回応用物理学会秋季学術講演会, 7a-A401-1, 2017.
- [23] 山谷泰賀, "Whole gamma imaging (WGI)コンセプト - PETとコンプトンイメージングを組み合わせた新手法への挑戦 -," 信学技報(IEICE Technical Report), Vol. 117, No. 220, pp. 13-14, 2017. (電子情報通信学会 医用画像研究会(MI), 特別講演) (招待講演)
- [24] 山谷泰賀, "シンチレータ単結晶は適材適所!? 陽電子断層撮影法(PET)の次世代機の研究開発," 結晶成長の科学と技術第 161 委員会第 102 回研究会「放射線と結晶を用いた分析技術」, 2017. (招待講演)
- [25] Taiga Yamaya, Katia Parodi, "Whole gamma imaging," International Open Laboratory Symposium 2017 Abstracts, pp. 11-12, 2017 (招待講演)
- [26] Taiga Yamaya, "PET Innovations at NIRS - How Imaging Improves Quality of Life," proceedings for the 5th Intl. Conf. on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), 2016 (招待講演)
- [27] Eiji Yoshida, Hideaki Tashima, Craig S. Levin, Katia Parodi, Taiga Yamaya, "Sensitivity and spatial resolution simulation of a PET-Compton insert imaging system," 2016 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, M04D-10, 2016. (poster, Strasbourg)
- [28] Jianyong Jiang, Eiji Yoshida, Hideaki Tashima, Kohei Shinohara, Mikio Suga, Taiga Yamaya, "Geant4 simulation study of a Compton-PET imaging system using advanced 3D positioning detectors," 医学物理, 第 36 巻 Sup. 1 (第 111 回日本医学物理学学会学術大会報文集), p. 190, 2016. (O-146, パシフィコ横浜)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称： 部分リング PET 装置及び PET 装置  
発明者： 山谷泰賀, 田島英朗  
権利者： 量子科学技術研究開発機構  
種類： 特許  
番号： 特願 2017-29405,  
出願年： 2017  
国内外の別： 国内

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

次世代 PET 研究報告書

<https://www.nirs.qst.go.jp/usr/medical-imaging/ja/study/>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名： 菅 幹生  
ローマ字氏名： Suga, Mikio  
所属研究機関名： 千葉大学  
部局名： フロンティア医工学センター  
職名： 准教授  
研究者番号（8桁）： 00294281

研究分担者氏名： 高橋 浩之  
ローマ字氏名： Takahashi, Hiroyuki  
所属研究機関名： 東京大学  
部局名： 大学院工学系研究科（工学部）  
職名： 教授  
研究者番号（8桁）： 70216753

### (2)研究協力者

研究協力者氏名： 吉田 英治  
ローマ字氏名： Yoshida, Eiji

研究協力者氏名： 錦戸 文彦  
ローマ字氏名： Nishikido, Fumihiko

研究協力者氏名： 田島 英朗  
ローマ字氏名： Tashima, Hideaki

研究協力者氏名： 小畠 隆行  
ローマ字氏名： Obata, Takayuki

研究協力者氏名： 辻 厚至  
ローマ字氏名： Tsuji, Atsushi

研究協力者氏名： 永津 弘太郎  
ローマ字氏名： Nagatsu, Kotaro

研究協力者氏名： Mohammadi Akram  
ローマ字氏名：

研究協力者氏名： 島添 健次  
ローマ字氏名： Shimazoe, Kenji

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。